

# **SEMI-DISTRIBUOVANÉ ZRÁŽKOVO- ODTOKOVÉ MODELOVANIE PRE POSÚDENIE ZMENY SNEHOVEJ POKRÝVKY NA POVODIACH SLOVENSKA**

## **SEMI-DISTRIBUTED RAINFALL-RUNOFF MODELING FOR EVALUATING CHANGES IN SNOW COVER IN SLOVAK RIVER BASINS**

*Ing. Martin Belan*

### **Anotácia**

Cieľom práce je posúdenie vodnej hodnoty snehu na povodiach horného Hrona a Turca pomocou semi-disribuovaného zrážkovo-odtokového modelu Hron. Výsledkom sú porovnania simulovaných a meraných vodných hodnôt snehu na povodiach a ich zhodnotenie.

### **Kľúčové slová :**

semi-distribované zrážkovo-odtokové modelovanie, vodná hodnota snehu, krížová validácia

### **Annotation**

The aim of this work is the assessment of snow water equivalent in upper Hron river basin and Turiec river basin by semi-distributed rainfall-runoff model Hron. The result is a comparison of simulated and measured snow water equivalent in river basins and their evaluation.

### **Keywords:**

semi-distributed rainfall-runoff modeling, snow water equivalent, cross validation

Ing. Martin Belan,  
Slovenský hydrometeorologický ústav, Jeséniova 17, 833 15 Bratislava, Slovenská republika  
+421 2 59 415 450,  
Email : [Martin.Belan@shmu.sk](mailto:Martin.Belan@shmu.sk)

## Abstrakt

Príspevok je venovaný posúdeniu zmeny snehovej pokrývky, resp. množstvu vody, ktoré vznikne topením snehu na povodiach horného Hrona a rieky Turiec pomocou semi-distribúovaného zrážkovo-odtokového modelovania. Pre potreby práce sa bolo nevyhnutné oboznámiť s problematikou ohľadom zrážkovo-odtokových modelov, ich rozdeleniu a zaviesť pojem semi-distribúované modelovanie. Stručnejšie popisujem semi-distribúovaný zrážkovo-odtokový model, ktorý som využil v práci.

Praktická časť príspevku zahŕňa spracovanie údajov vstupujúcich do modelu v dennom časovom kroku, akými boli priemerné teploty vzduchu, úhrny zrážok, potenciálna evapotranspirácia a priemerné denné prietoky v záverečnom profile povodia. V rámci semi-distribúovaného modelovania bolo nutné tieto vstupy distribuovať podľa piatich výškových zón a rozdeliť ich na dve časové obdobia za účelom krížovej validácie. Na posúdenie kvality simulácie bolo použité optimalizačné kritérium Nash-Sutcliffov koeficient zhody medzi meranými a simulovanými prietokmi. Výsledkom semi-distribúovaného zrážkovo-odtokového modelovania je simulovaná vodná hodnota snehu, ktorú som porovnával s meranou vodnou hodnotou snehu.

## Abstract

This paper is devoted to the assessment of changes in snow cover, respectively, the amount of water, which is created by the snow melting in upper Hron river basin and Turiec river basin by semi-distributed rainfall-runoff modeling. For purpose of this paper was necessary given the knowledge of the problems about the rainfall-runoff models, their distribution and introduce the concept of semi-distributed modeling. I'm described a semi-distributed rainfall-runoff model, that I used for purpose of the work.

The practical part of this work, was consisted of the processing of input data to the model at a daily time step, such as the average air temperature, precipitations, potential evapotranspiration and average daily flows in the final profile of catchment. Within semi-distributed modeling it was necessary to distribute these inputs by a five altitude zones and divide them into two time periods for the purpose of cross validation. For assessment the quality of the simulation was used optimization criterion Nash-Sutcliffe coefficient of correlation between measured and simulated flows. The result of semi-distributed rainfall-runoff modeling is simulated snow water equivalent, which were compared with the measured snow water equivalent.

## 1 Úvod

Snehová pokrývka patrí na našom území k významnému prírodnému fenoménu z dôvodu jeho značného vplyvu na vodný cyklus. Prejavuje sa hlavne kvantitatívnymi prejavmi v jarnom období, kedy pri procese topenia snehu z hľadiska ročného rozdelenia odtoku dochádza k významným extrémnym hydrologickým situáciám.

Snehová pokrývka má množstvo charakteristík ako sú tvar, veľkosť kryštálov, výška snehovej pokrývky, hustota, pórovitosť, albedo, tvrdosť snehu alebo tepelná vodivosť. Avšak jedna z najvýznamnejších charakteristík snehovej pokrývky z pohľadu hydroológov a vodohospodárov je vodná hodnota snehu. Pre analýzu tohto procesu je potrebné aj zrážkovo-odtokové modelovanie vodnej hodnoty snehu, resp. množstva vody vzniknutej roztopením snehu.

## 2 Zrážkovo-odtokové modelovanie

Pod pojmom zrážkovo-odtokový model rozumieme určitý matematický model, ktorý pomocou rovníc a premenných simuluje hydrologický cyklus, ktorý prebieha v reálnom prostredí a predstavuje zjednodušený kvantitatívny vzťah medzi vstupnými a výstupnými veličinami hydrologického systému [1]. Finálne teda môžeme chápať zrážkovo-odtokový model ako zjednodušené napodobenie zložitých hydrologických procesov prebiehajúcich v prírode do podoby určitého algoritmu vo virtuálnom prostredí.

Rozdielna dostupnosť vstupných údajov, štruktúra povodia, účel aplikácie, časová a priestorová diskretizácia umožnili vznik veľkého množstva zrážkovo-odtokových modelov, ktoré sa začlenili do rôznych kategórií (napr. deterministické, stochastické, distribuované, semi-distribuované alebo celistvé modely). V práci využívam konkrétne semi-distribuovaný zrážkovo-odtokový model, nazývaný aj model s polo-rozčlenenými parametrami.

Semi-distribuované modely predstavujú kombináciu celistvých a distribuovaných modelov [2]. Model rozdelí povodie na čiastkové plochy s rovnakými priestorovými parametrami. V našom prípade vznikne semi-distribuovaný model pridaním piatich výškových zón do povodí riek Hron a Turiec. Výškové zóny majú preddefinované vlastnosti ako sú váha, hranice a priemerná nadmorská výška danej výškovej zóny (Vid' Tab.1 a Tab.2).

## 3 Opis semi-distribuovaného zrážkovo-odtokového modelu Hron

Model Hron je koncepčný semi-distribuovaný, resp. celistvý zrážkovo-odtokový model vyvinutý na Katedre vodného hospodárstva krajiny, Stavebnej fakulty STU v Bratislave [3]. Ide o upravený HBV model, pracujúci s denným časovým krokom [4], [5]. Model možno označiť aj ako model hydrologickej bilancie, keďže množstvo vody na vstupe je rovné množstvu na výstupe. Rovnicu hydrologickej bilancie modelu je možné zapísať v tvare [6]:

$$S_i - S_{i-1} = P_i - (AET_i + qSn_i + qF_i + qSl_i + qB_i) \quad (1)$$

kde:

$S_i, S_{i-1}$	- aktuálna zásoba vody v danej zóne na konci dňa $i$ a $i-1$ ,
$i$	- časový krok,
$P_i$	- úhrn zrážok v danej zóne
$AET_i$	- aktuálne evapotranspirácia z danej zóny v dni $i$ ,
$qSn_i$	- odtok spôsobený rýchlym topením snehovej pokrývky v dni $i$ ,
$qF_i$	- rýchly odtok (povrchový a podpovrchový) v dni $i$ ,
$qSl_i$	- oneskorený odtok (podpovrchový) v dni $i$ ,
$qB_i$	- základný odtok v dni $i$ .

Štruktúra modelu Hron sa skladá z troch submodelov: snehového, pôdneho a odtokového submodelu.

Pre potreby práce je dôležitý snehový submodel a jeho štruktúra zostavenia, ktorého úlohou je simulovať akumuláciu a topenie snehu, resp. modelovať vodnú hodnotu snehu.

## 4 Výber záujmových povodí a ich rozdelenie do výškových zón

V rámci semi-distribuovaného zrážkovo-odtokového modelovania vodnej hodnoty snehu som zvolil metodický postup rozdelenia povodia na čiastkové plochy podľa nadmorských výšok. Pre definované výškové zóny bolo potrebné určiť váhy, hranice a

priemerné nadmorské výšky. Postup som aplikoval pre povodia riek Hron po Banskú Bystricu a Turca, ktoré sú vhodné pre modelovanie vodnej hodnoty snehu vďaka svojmu reprezentatívne horskému charakteru v podmienkach Slovenskej republiky. Rozdelenie záujmových povodí na 5 výškových zón je v Tab.1 a Tab.2:

Tab. 1: Rozdelenie povodia horného Hrona do výškových zón

	Plocha záujmového územia [km <sup>2</sup> ]	Váha	Hranice zóny [m n.m.]	Priemerná nadmorská výška [m n.m.]
výšková zóna 1	380,04	0,22	260 – 616	438
výšková zóna 2	906,16	0,51	617 – 972	794
výšková zóna 3	373,48	0,21	973 – 1328	1 150
výšková zóna 4	92,68	0,05	1329 – 1684	1 506
výšková zóna 5	16,28	0,01	1685 – 2040	1 862
celková	1 768,64	1,00	260 – 2040	1 150

Tab. 2: Rozdelenie povodia Turca do výškových zón

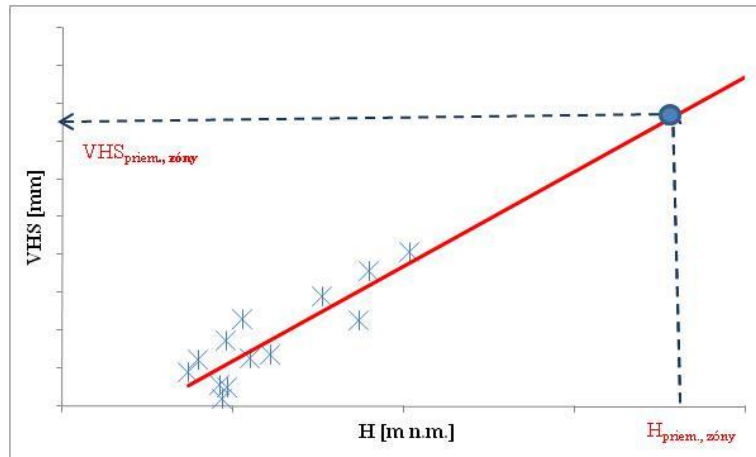
	Plocha záujmového územia [km <sup>2</sup> ]	Váha	Hranice zóny [m n.m.]	Priemerná nadmorská výška [m n.m.]
výšková zóna 1	384,79	0,464	393 – 633	512
výšková zóna 2	238,79	0,288	634 – 873	751
výšková zóna 3	148,64	0,179	874 – 1113	980
výšková zóna 4	49,68	0,061	1114 – 1353	1 202
výšková zóna 5	70,00	0,008	1354 – 1592	1 427
celková	828,90	1,000	393 – 1592	993

## 5 Výpočet klimatických charakteristík vo výškových zónach na povodie

Ako vstupné údaje potrebné k modelovaniu vodnej hodnoty snehu patria denné zrážkové úhrny získané zo zrážkomerných staníc na povodiach. Denné úhrny zrážok pre vybrané povodie sú spracované metódou inverzne váženej vzdialenosti. Základným princípom metódy je priradenie väčšej váhy bodom, ktoré sú bližšie k hľadanému interpolovanému bodu. Podrobnejší opis použitej metódy za účelom spracovania úhrnov zrážok na povodie danej výškovej zóny opisuje [6].

Ďalším vstupným údajom sú priemerné denné teploty vzduchu získané z klimatických staníc na povodiach. Keďže som územie rozdelil na 5 výškových zón, bolo potrebné spracovať tieto hodnoty pre priemerné nadmorské výšky daných zón pomocou metódy výškového gradientu. Metóda spočíva vo vytvorení jednoduchého lineárneho modelu ako závislosti medzi nadmorskými výškami klimatických staníc a teplotami vzduchu vo vybraných klimatických staniaciach. Na základe lineárnej regresie som získal priemernú teplotu vzduchu v daný deň pre priemernú nadmorskú výšku danej zóny. Rovnaký postup som opakovane pre všetky dni pozorovaného časového radu.

Rovnaký postup lineárneho modelu som aplikoval aj na merané vodné hodnoty snehu potrebné k verifikácii modelu. Keďže namerané vodné hodnoty snehu neboli kontinuálne merané približne v týždennom intervale, spracoval som merané vodné hodnoty snehu len pre tie dni, kde sa vyskytli merané údaje minimálne v dvoch staniaciach. Výsledkom boli merané vodné hodnoty snehu pre 5 zón pre každý deň s disponibilnými údajmi. Princíp výpočtu vodnej hodnoty snehu pomocou lineárneho modelu je zobrazený na Obr. 1.



Obr. 1: Princíp výpočtu vodnej hodnoty snehu vo zvolenej výškovej zóne

Na výpočet dennej potenciálnej evapotranspirácie som použil metódu Blaney-Criddle [7], ktorá je daná vzťahom:

$$DPET = -1,55 + 0,96 \cdot (8,128 + 0,457 \cdot T_a) \cdot \frac{S_D}{S_Y} \cdot 100 \quad (2)$$

kde  $T_a$  reprezentuje priemernú dennú teplotu vzduchu,  $S_D$  potenciálnu dĺžku slnečného svitu počas dňa a  $S_Y$  priemernú ročnú sumu potenciálnej dĺžky slnečného svitu počas dňa.

## 6 Kalibrácia a validácia modelu

Dôležitou súčasťou modelu sú jeho parametre, ktoré nám umožňujú kontrolovať a upravovať vlastnosti simulovaných javov. V prípade koncepčných semi-distribovaných modelov je potrebné parametre stanoviť pomocou kalibrácie, ktorú možno chápať ako snahu určiť prijateľnú a unikátnu sadu parametrov, najlepšie zabezpečujúcu zhodu medzi meranými a simulovanými údajmi, za cieľom dosiahnutia najlepšej zhody medzi meranými a simulovanými premennými [8].

Pre potreby tejto práce využívam metódu automatickej kalibrácie, kde optimalizačným nástrojom bola metóda Harmonického prehľadávania [9].

Spoľahlivosť kalibrácie modelu posudzujem podľa optimalizačného kritéria, ktoré v práci reprezentuje Nash-Sutcliffov koeficient, ďalej len *NS*. Hodnota koeficientu sa môže vyskytovať v intervale  $(-\infty, 1)$ . Čím sa táto hodnota blíži k 1, tým je kvalita simulácie modelu presnejšia. Hodnotu Nash-Sutcliffovho koeficientu vypočítame pomocou nasledovnej rovnice [10]:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim}^i - Q_{poz}^i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{sim}^i - Q_{poz}^i)^2} \quad (3)$$

kde  $Q_{sim}$  reprezentuje simulovanú hodnotu prietoku,  $Q_{poz}$  reprezentuje meranú hodnotu prietoku,  $Q_{poz}$  reprezentuje priemernú hodnotu pozorovaného prietoku.

Princíp kalibrácie spočíva v menení hraníc parametrov modelu za účelom nájdenia ich optimálnej hodnoty z intervalu určených hranicami. Pre optimalizovanie parametrov modelu boli použité dolné a horné hranice týchto parametrov (Tab. 4), ktoré určujú interval, v ktorom sa vyskytujú. Vo všeobecnosti sme si pozorované časové rady vstupných údajov rozdelili na dve obdobia za účelom krížovej validácie (Tab. 3). Princíp krížovej validácie spočíva v tom, že v 1. etape sme kalibrovali model na obdobie 1 a potom sme ho validovali na obdobie

2. V etape 2 sme aplikovali opačný postup, resp. najprv sme kalibrovali model na obdobie 2 a potom sme ho validovali na období 1.

Tab. 3: Princíp krížovej validácie modelu

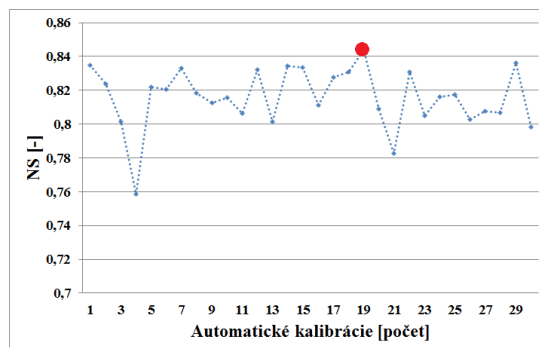
	Obdobie 1	Obdobie 2
Etapa 1	Kalibrácia	Validácia
Etapa 2	Validácia	Kalibrácia

Okrem spomenutých vstupných údajov v jednotlivých výškových zónach sú ďalším vstupom potrebným ku kalibrácii a validácii modelu, aj váhy príslušných výškových zón a počiatkové podmienky (hodnota pôdnej vlhkosti  $SM = 40$  mm, vodná hodnota snehu  $SWE = 80$  mm, výška vody v hornej nádrži  $SUZ = 15$  mm, výška vody v dolnej nádrži  $SLZ = 60$  mm), ktoré charakterizujú simulované stavy povodia.

Tab. 4: Zoznam kalibrovateľných parametrov s hranicami

Parameter	Špecifikácia	Jednotky	Dolná a horná hranica na povodí horného Hrona	Dolná a horná hranica na povodí Turca
fc	pôdna kapacita – množstvo vody, ktoré je pôda schopná zadržať	[mm]	<120 ; 245>	<150 ; 265>
rc	koeficient ovplyvňujúci množstvo vody prispievajúce do pôdnej vlhkosti a hornej nádrže	[-]	<1,4 ; 3,2>	<0,8 ; 2,8>
uzl	Limit hornej nádrže – hraničná hodnota, pri ktorej nastane povrchový odtok $q_0$	[mm]	<10 ; 27>	<6 ; 26>
tempRain	Hraničná hodnota nad ktorou je celá zrážka kvapalná	[°C]	<2 ; 10>	<2 ; 10>
tempMelt	Hraničná hodnota, pri ktorej nastáva topenie snehu	[°C]	<-2 ; 0,9>	<-1,8 ; 1,5>
tempSnow	Hraničná hodnota, pod ktorou je celá zrážka pevná (snehová)	[°C]	<-7,8 ; -1>	<-9 ; 0>
ddf	Degree-day-factor – určujúci rýchlosť topenia snehu	[mm]	<1,2 ; 3>	<1 ; 3,1>
perc	Perkolácia – množstvo vody, ktoré sa dostane z hornej do dolnej nádrže	[mm]	<1,2 ; 3,5>	<1 ; 2,9>
lpe	Limit potenciálnej evapotranspirácie – slúži na odhad potenciálnej evapotranspirácie	[-]	<0,3 ; 1,2>	<0,1 ; 1,0>
k0	Empirický parameter ovplyvňujúci povrchový odtok $q_0$	[-]	<3,5 ; 14,5>	<3 ; 14>
k1	Empirický parameter ovplyvňujúci povrchový odtok $q_1$	[-]	<1,5 ; 10,5>	<1 ; 6>
k2	Empirický parameter ovplyvňujúci povrchový odtok $q_2$	[-]	<12 ; 26>	<17 ; 36>
scf	Snowcorrectionfactor – slúži na úpravu množstva tuhých zrážok		<1 ; 1>	<1 ; 1>
maxbass	Parameter určujúci množstvo dní, do ktorých sa celkový odtok rozdelí pomocou váženej trojuholníkovej funkcie		<1 ; 3>	<1 ; 3>

Pre odhad parametrov modelu bola spustená automatická kalibrácia 30-krát s rôznymi nastaveniami hraníc týchto parametrov za účelom nájdania ich optimálnej hodnoty na obidvoch povodiach. Pre ukážku je priebeh kalibrácie parametrov modelu ako aj priebeh *NS koeficienta* na povodí Hrona po Banskú Bystricu zobrazený na Obr. 2, kde bola optimálna sada parametrov modelu odhadnutá v 19. behu s hodnotou  $NS = 0,8436$ .



Obr. 2: Kalibrácia sady parametrov na povodí Hrona po Banskú Bystricu

Tento postup som aplikoval pre dané povodia v obidvoch etapách krížovej validácie. V nasledujúcej Tab. 5 sú hodnoty Nash-Sutcliffovho koeficientu pre jednotlivé obdobia krížovej validácie na povodí Hrona po Banskú Bystricu. V tomto prípade je obdobie 1 od 1.1.1961 do 31.12.1990 a obdobie 2 od 1.1.1991 do 31.12.2010. Na povodí Turca je obdobie 1 od 1.1.1981 do 31.12.1997 a obdobie 2 od 1.1.1998 do 31.12.2013 (Tab. 6).

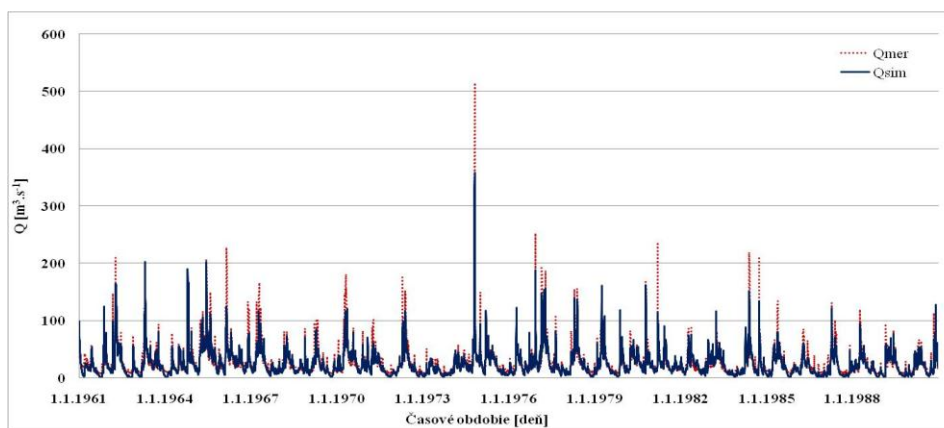
Tab. 5: Hodnoty NS koeficienta na povodí rieky Hron po Banskú Bystricu

	1.1.1961–31.12.1990	1.1.1991–31.12.2010
<b>Etapa 1</b>	0,8436	0,8133
<b>Etapa 2</b>	0,8423	0,8275

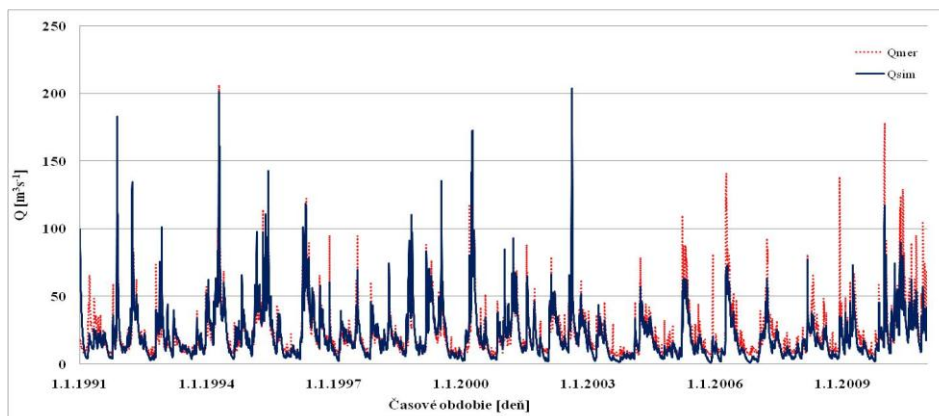
Tab. 6: Hodnoty NS koeficienta na povodí rieky Turiec

	1.1.1981–31.12.1997	1.1.1998–31.12.2013
<b>Etapa 1</b>	0,7968	0,7751
<b>Etapa 2</b>	0,8326	0,7785

Zhodnotenie kalibrácie semi-distribúovaného zrážkovo-odtokového modelu spočíva v porovnaní zhody meraných ( $Q_{mer}$ ) a simulovaných ( $Q_{sim}$ ) priemerných denných prietokov v záverečnom profile povodia v kalibračnom a validačnom období. Príklad porovnania  $Q_{mer}$  a  $Q_{sim}$  na povodí horného Hrona po Banskú Bystricu je na Obr. 3a a Obr. 3 b.

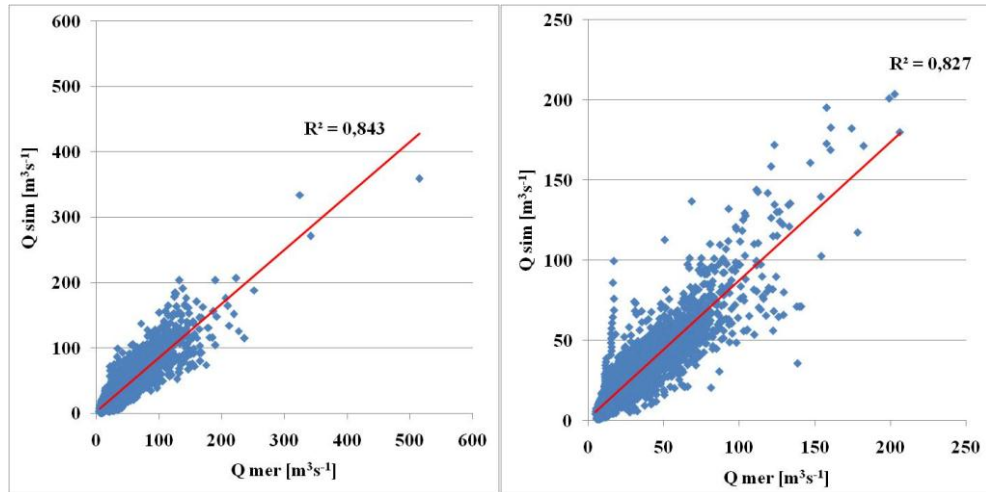


Obr. 3 a: Porovnanie  $Q_{mer}$  a  $Q_{sim}$  v kalibračnom období (1.1.1961 do 31.12.1990) na povodí horného Hrona po Banskú Bystricu



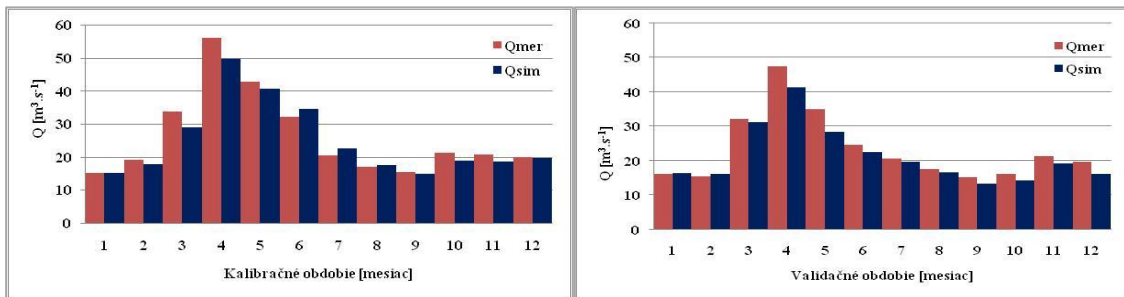
Obr. 3 b: Porovnanie  $Q_{mer}$  a  $Q_{sim}$  vo validačnom období (1.1.1991 do 31.12.2010) na povodí Hrona po Banskú Bystricu

Pri zhodnotení kalibrácie sa môže aplikovať mnoho ďalších porovnaní. Ide napríklad o porovnanie vo forme bodovej závislosti  $Q_{mer}$  a  $Q_{sim}$  v kalibračnom a validačnom období na základe, ktorej zistíme koeficienty determinácie a tomu príslušnú koreláciu. Príklad grafického zobrazenia bodovej závislosti medzi  $Q_{mer}$  a  $Q_{sim}$  na povodí Hrona po Banskú Bystricu je na Obr. 4 a,b. Na tomto povodí nám vyšli koeficienty determinácie 0,843 v kalibračnom a 0,827 vo validačnom období 1. etapy. Na povodí rieky Turiec vyšli koeficienty determinácie 0,738 a 0,838 v 1. etape.

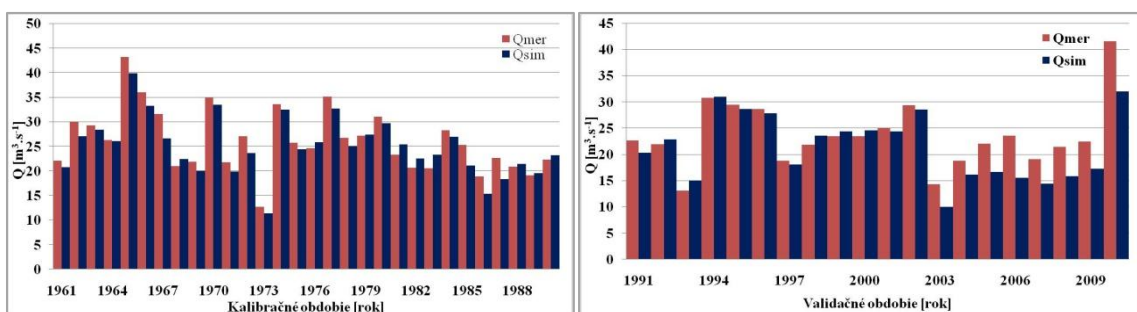


Obr. 4 a, b: Bodová závislosť  $Q_{mer}$  a  $Q_{sim}$  v kalibračnom (1.1.1961 do 31.12.1990) a validačnom (1.1.1991 do 31.12.2010) období pre povodie rieky Hron po Banskú Bystricu

Ďalším možným porovnaním sú porovnania mesačných a ročných prietokov na povodiach. Na Obr. 5 a Obr. 6 je príklad takéhoto porovnania na povodí Hrona po Banskú Bystricu, kde červenou farbou sú znázornené  $Q_{mer}$  a modrou farbou  $Q_{sim}$ .



Obr. 5 a, b: Priemerné mesačné prietoky na povodí rieky Hron po Banskú Bystricu v kalibračnom (1.1.1961 – 31.12.1990) a validačnom období (1.1.1991 – 31.12.2010)

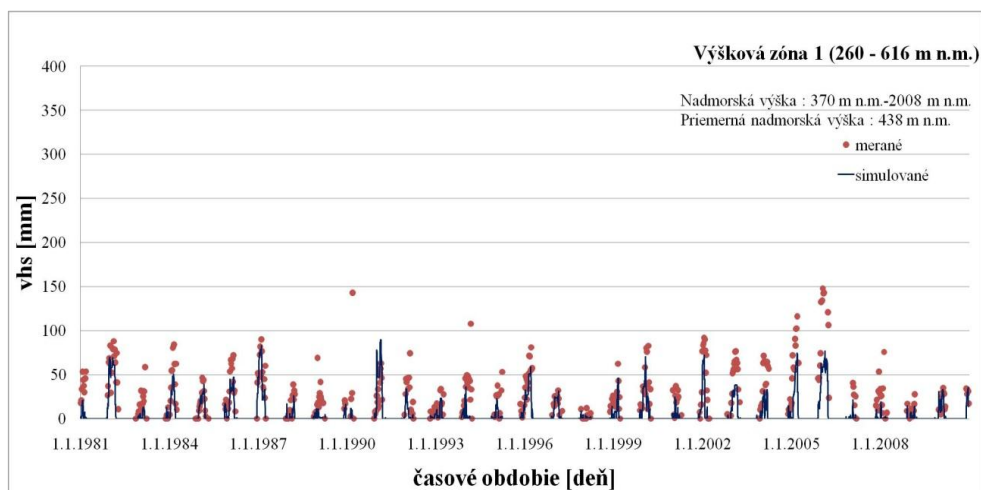


Obr. 6 a, b: Priemerné ročné prietoky na povodí rieky Hron po Banskú Bystricu v kalibračnom (1.1.1961 – 31.12.1990) a validačnom období (1.1.1991 – 31.12.2010)

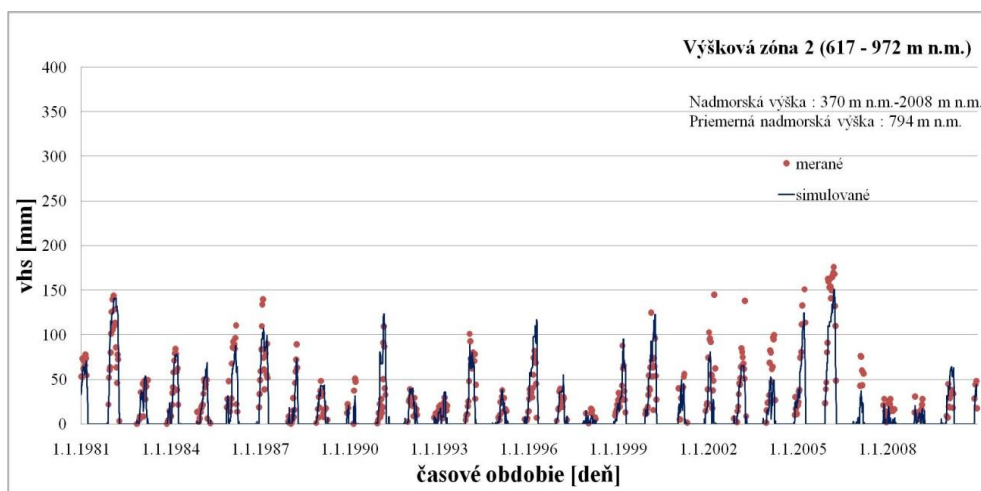


## 7 Porovnanie vodnej hodnoty snehu

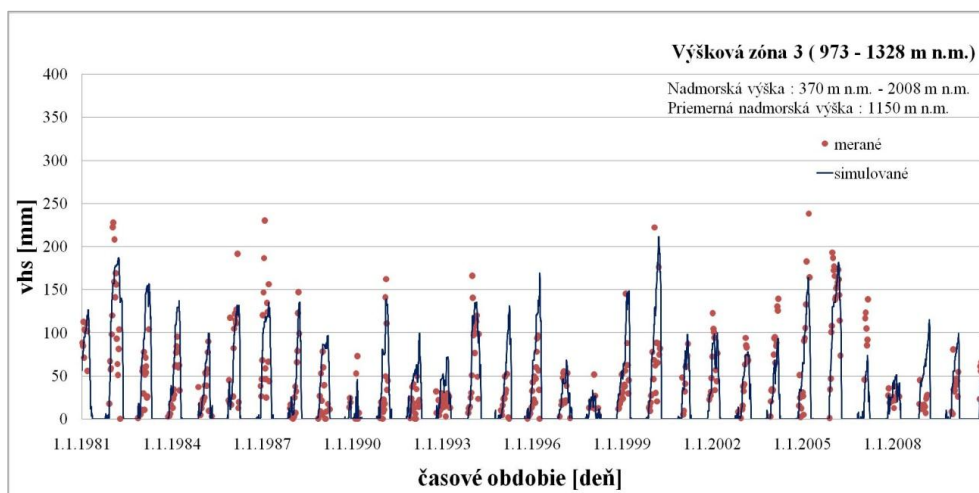
Výsledné zhodnotenie modelovania vodnej hodnoty snehu spočíva v porovnaní  $VHS_{mer}$  a  $VHS_{sim}$  v jednotlivých zvolených výškových zónach. Tieto porovnanie boli realizované pomocou bodovej závislosti medzi meranými a simulovanými vodnými hodnotami, kde modrá spojité čiara značí simulovaný rad vodnej hodnoty snehu, ktorý sme dostali ako výstup z modelu a červené body definujú meraný rad vodnej hodnoty snehu, ktorý sme spracovali už skôr (Vid' kapitola 5). Porovnanie v grafickej podobe prezentujem pre povodie Hrona po Banskú Bystricu (Obr. 7 a,b,c,d,e) a povodie Turca (Obr. 8 a, b, c, d, e).



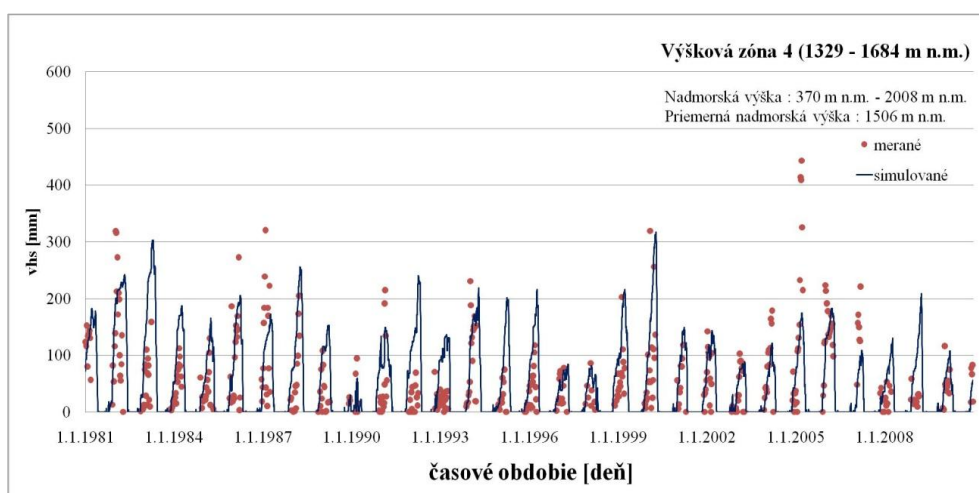
Obr. 7 a: Porovnanie  $VHS_{mer}$  a  $VHS_{sim}$  vo výškovej zóne 1 na povodí horného Hrona



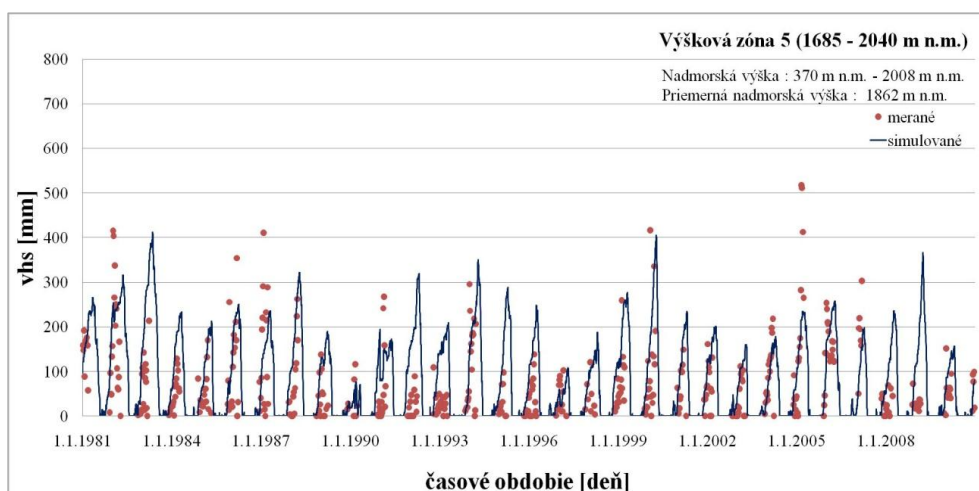
Obr. 7 b: Porovnanie  $VHS_{mer}$  a  $VHS_{sim}$  vo výškovej zóne 2 na povodí horného Hrona



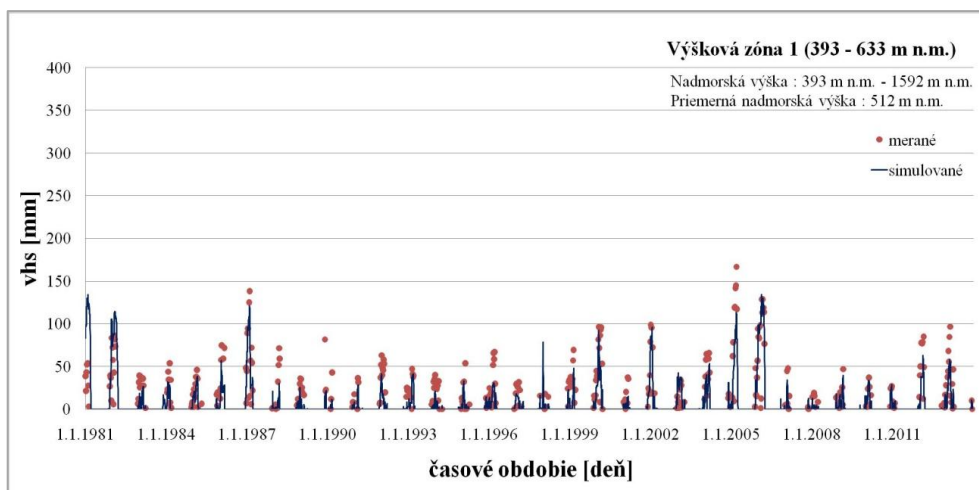
Obr. 7 c: Porovnanie  $VHS_{mer}$  a  $VHS_{sim}$  vo výškovej zóne 3 na povodí horného Hrona



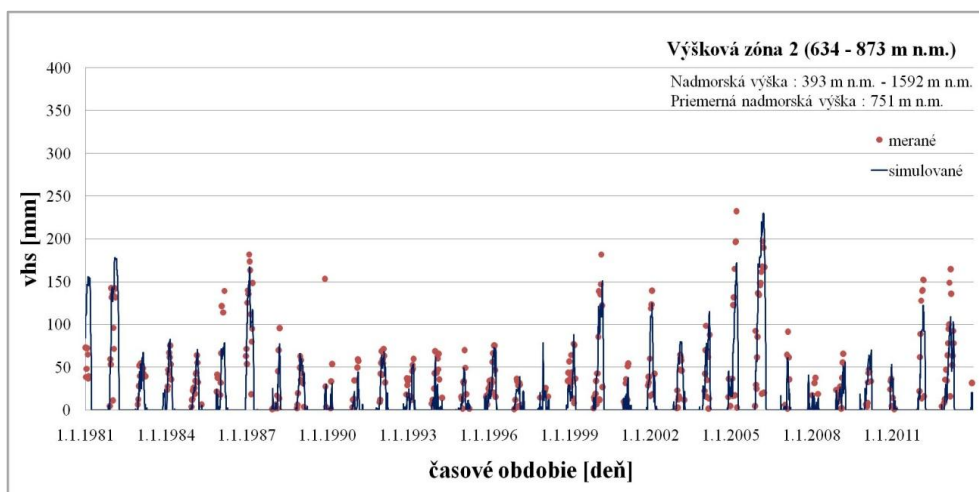
Obr. 7 d: Porovnanie  $VHS_{mer}$  a  $VHS_{sim}$  vo výškovej zóne 4 na povodí horného Hrona



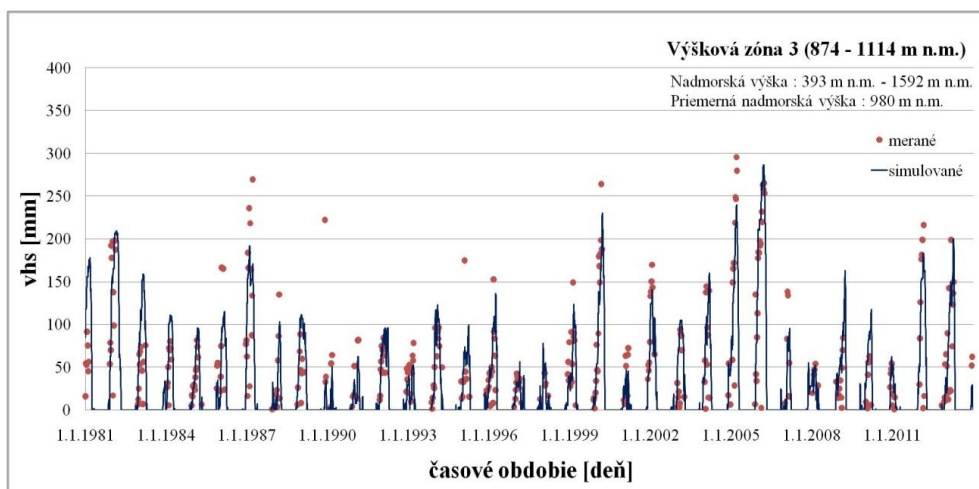
Obr. 7 e: Porovnanie  $VHS_{mer}$  a  $VHS_{sim}$  vo výškovej zóne 5 na povodí horného Hrona



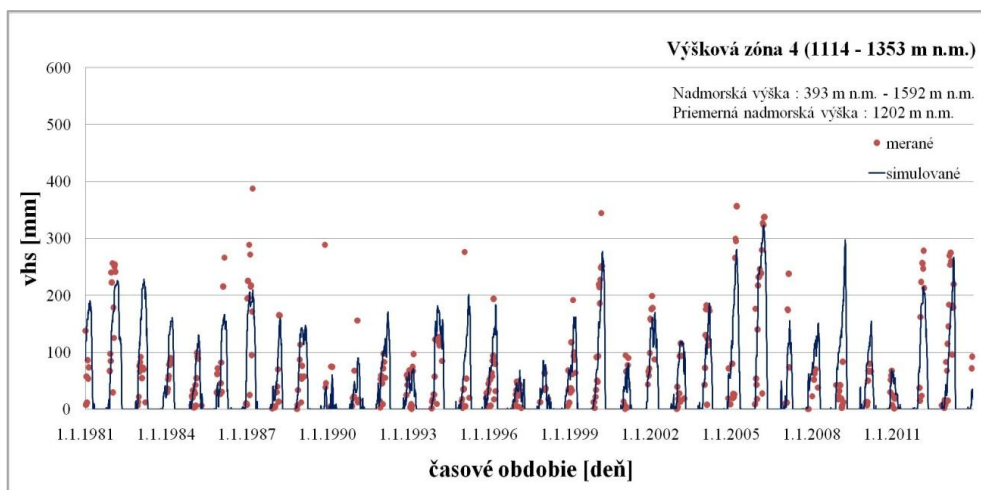
Obr. 8 a: Porovnanie  $VHS_{mer}$  a  $VHS_{sim}$  vo výškovej zóne 1 na povodí Turca



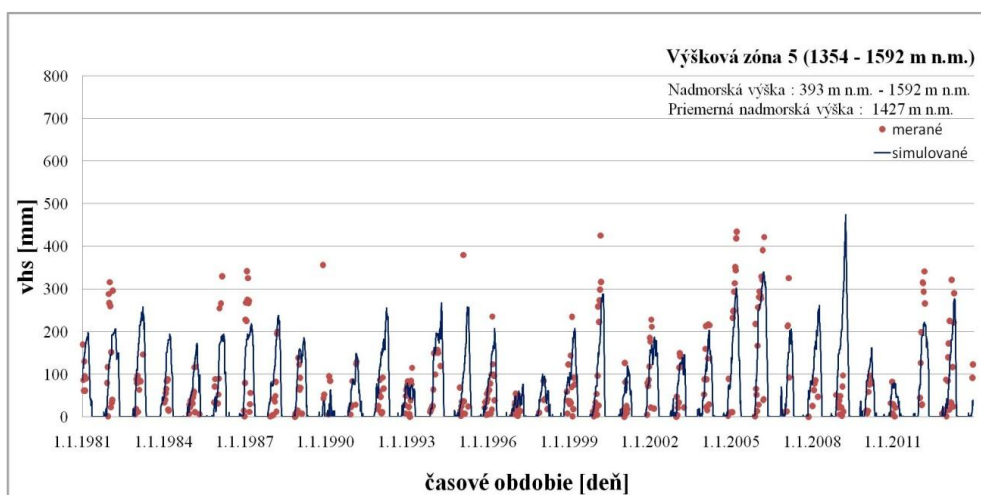
Obr. 8 b: Porovnanie  $VHS_{mer}$  a  $VHS_{sim}$  vo výškovej zóne 2 na povodí Turca



Obr. 8 c: Porovnanie  $VHS_{mer}$  a  $VHS_{sim}$  vo výškovej zóne 3 na povodí Turca

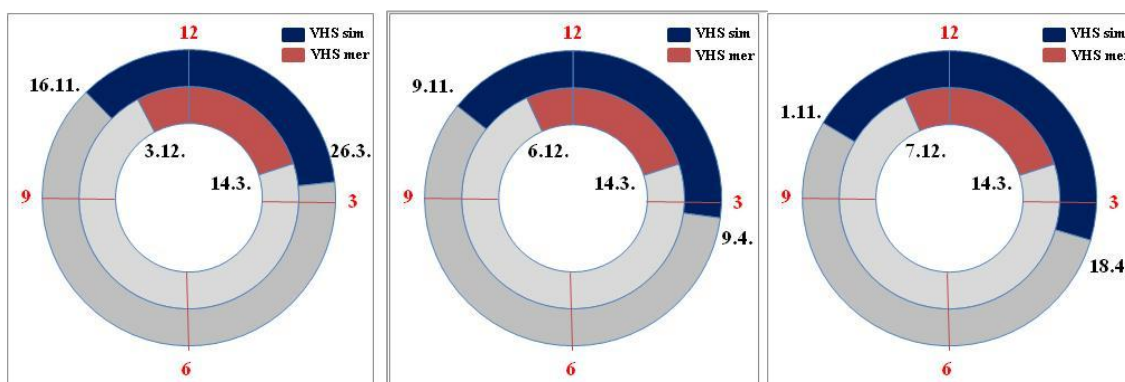


Obr. 8 d: Porovnanie  $VHS_{mer}$  a  $VHS_{sim}$  vo výškovej zóne 4 na povodí Turca

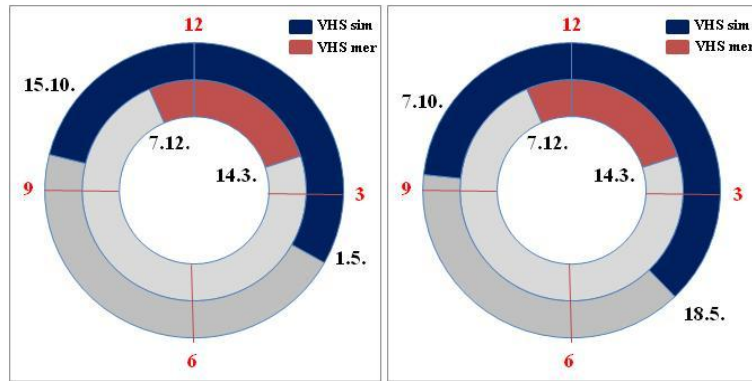


Obr. 8 e: Porovnanie  $VHS_{mer}$  a  $VHS_{sim}$  vo výškovej zóne 5 na povodí Turca

Zaujímavým zhodnotením výsledkov modelovania môžu byť aj prstencové grafy, ktoré nám pomocou pomyselných hodín symbolizujú trvanie zimy na povodiach v rôznych výškových zónach. Na Obr. 9 som graficky zobrazil trvanie zimy na povodí rieky Turiec. Modrý prstenec symbolizuje trvanie zimy na základe  $VHS_{sim}$  a červený prstenec na základe  $VHS_{mer}$ . Pričom za začiatok zimy sa považuje deň kedy napadol prvý sneh.



Obr. 9 a, b, c: Trvanie zimy vo výškových zónach 1,2 a 3 na povodí rieky Turiec



Obr. 9 d, e: Trvanie zimy vo výškových zónach 4 a 5 na povodí rieky Turiec

## 8 Sumár dosiahnutých výsledkov

V predkladanej práci bolo realizované semi-distribované zrážkovo-odtokové modelovanie vodnej hodnoty snehu, pričom bolo potrebné zvolený semi-distribovaný zrážkovo-odtokový model kalibrovať a validovať v rámci krížovej validácie pre povodie horného Hrona po Banskú Bystricu a povodie rieky Turiec. Pre zvolený metodický postup práce bolo nevyhnutné porovnanie kvality simulácie prietoku v záverečnom profile povodí a následne aj vodnej hodnoty snehu v rámci zvolených výškových pásiem.

Pri kalibrácii modelu na povodí rieky Hron po Banskú Bystricu sme dosiahli hodnotu optimalizačného kritéria Nash-Sutcliff 0,8436 v období od 1.1.1961 do 31.12.1990 a vo validačnom období od 1.1.1991 do 31.12.2010 nadobudlo toto kritérium hodnotu 0,8133. Za účelom lepšieho zhodnotenia výsledkov a overenia podobných charakteristických vlastností oboch období sme vykonali 2. etapu krížovej validácie, kedy NS vyšiel 0,8423 v kalibračnom období (1.1.1991 - 31.12.2010) a 0,8275 vo validačnom období (1.1.1961 - 31.12.1990). Z Obr. 4 a, b pri koeficiente determinácie 0,843 a 0,827 možno usúdiť, že  $Q_{sim}$  sa v uspokojivej zhode podobá na  $Q_{mer}$ . Ďalej sme porovnávali  $Q_{mer}$  a  $Q_{sim}$  v mesačnom (Obr. 5 a, b) a ročnom (Obr. 6 a, b) časovom kroku, kedy možno konštatovať, že model dostatočne zachováva priebeh a vývoj meraných prietokov v týchto časových mierkach.

Pri kalibrácii modelu na povodí rieky Turiec sme dosiahli hodnotu optimalizačného kritéria Nash-Sutcliff 0,7968 pre obdobie 1.1.1981 - 31.12.1997 a pri validácii 0,7751 v období (1.1.1998 - 31.12.2013). Pri kríženej validácii sa hodnota optimalizačného kritéria Nash-Sutcliff vyšplhala na 0,8326 v kalibračnom období (1.1.1998 - 31.12.2013) a 0,7785 vo validačnom období (1.1.1981 - 31.12.1997). Koeficienty determinácie medzi  $Q_{mer}$  a  $Q_{sim}$  vyšli 0,738 a 0,838.

Po porovnaní prietokov nasledovalo porovnanie simulovaných vodných hodnôt snehu. Grafické porovnania Obr. 7 a, b, c, d, e na povodí rieky Hron po Banskú Bystricu ukazujú uspokojivú zhodu medzi  $VHS_{mer}$  a  $VHS_{sim}$  vo všetkých výškových zónach.

Z grafického porovnania na Obr. 8 a, b, c, d, e na povodí rieky Turiec možno usúdiť, že model zachováva množstvo vody vzniknutej topením snehu  $VHS_{mer}$  v porovnaní s  $VHS_{sim}$  vo všetkých výškových zónach. Trvanie zimy na základe  $VHS_{mer}$  a  $VHS_{sim}$  sme porovnali pomocou prstencového grafu (Obr. 9 a,b,c,d,e) na pomyselných hodinách a možno z nich usúdiť, že so zvyšujúcou sa nadmorskou výškou zóny sa predlžuje aj trvanie zimy. Priemerné trvanie zimy bolo zohľadnené v prvých troch zónach a pre výškové zóny 4 a 5 sa vyskytli vyššie rozdiely tejto hodnoty, čo mohlo byť spôsobené metodickým postupom určenia meraných vodných hodnôt snehu v týchto zónach, resp. metódou výškového gradientu.

Z výsledkov a grafických zobrazení možno konštatovať, že pozorované vodné hodnoty snehu v jednotlivých výškových zónach pre obe povodia boli v uspokojivej zhode modelom



zohľadnené, avšak v ďalších prípadoch by bolo potrebné overiť jeho správnosť aj na viacerých povodiach v rámci Slovenska. Stretol som sa s výskytom možného nedostatku, hlavne v princípe odvodu meranej vodnej hodnoty snehu na povodí pre zvolené výškové zóny. Metodický postup uvedený v práci by bolo vhodné vyskúšať aj pri rozdelení povodia na čiastkové plochy podľa inej charakteristiky ako sú nadmorské výšky, a to napr. podľa vegetačných pásiem.

### Pod'akovanie:

Tento príspevok vychádza z mojej diplomovej práce. Touto cestou by som sa chcel poďakovať Ing. Romanovi Výletovi. PhD., z katedry Vodného hospodárstva krajiny, STU v Bratislave, ktorý mi poskytol mnoho užitočných rád a usmernení pri písaní diplomovej práce. Taktiež by som sa chcel poďakovať Slovenskému hydrometeorologickému ústavu za poskytnutie údajov k mojej práci.

### Literatúra :

- [1] Daňhelka, J., Krejčí, J., Šálek, J., Šerel, P., Zezulák, J. *Posouzení vhodnosti aplikace srážko-odtokových modelu s ohledem na simulaci povodňových stavu pro lokality na území ČR*. ČZU, Praha, 2003
- [2] Jeníček, M. *Klasifikace hydrologických modelu*, 2012
- [3] Kubeš, R. *Návrh koncepčného zrážkovo-odtokového modelu pre hydrologické predpovede*. Dizertačná práca, 2007
- [4] Bergstrom, S. *Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments*. SHMI RHO 7, Norrkoping, Sweden, 1976
- [5] Bergstrom, S. *The HBV model –its structure and applications*. REPORT RH, No.4, Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SHMI) Norrkoping, Sweden, 1992
- [6] Valent, P. *Zrážkovo-odtokové modelovanie pre frekvenčnú analýzu prietokov*. Dizertačná práca, 2014
- [7] Schrödter, H. *Verdunstung – Anwendungsorientierte Meßverfahren und Bestimmungsmethoden*. SPRINGER VERLAG, 1985
- [8] Kubeš, R.. *Návrh koncepčného zrážkovo-odtokového modelu pre hydrologické predpovede*. Dizertačná práca, 2007
- [9] Geem, Z. W. *Music-inspired harmony search algorithm: theory and applications*. SPRINGER, BERLIN, 2009
- [10] Nash, J.E., Sutcliffe, J.V. *River flow forecasting through conceptual models, part 1 – a discussion of principles*. JOURNAL OF HYDROLOGY, No.10, p. 282-290, 1970s